

Champs d'inondation et photographies aériennes

Détermination des hauteurs de submersion

Damien Raclot, Christian Puech

Les plaines d'inondation constituent un territoire très prisé par l'homme. Depuis longtemps, l'homme a essayé de maîtriser l'étalement des eaux par la construction de digues afin de protéger ces terres représentant une grande richesse potentielle. Ces nombreuses constructions ont, pour la plupart, été réalisées de façon plus ou moins anarchique et étalée dans le temps, ce qui a conduit à une structuration très forte de ces plaines. Cet héritage vieillissant pose aujourd'hui des problèmes de gestion qui viennent se positionner dans une problématique plus large d'aménagement des plaines, notamment eu égard au risque d'inondation.

En effet, la médiatisation des inondations de ces dernières années a ranimé les discussions autour de la gestion de l'eau et des risques associés. Rappelons que ce phénomène naturel mobilise en France près de 75 % des indemnités reversées par les assurances au titre des catastrophes naturelles, génère des milliers de sinistrés et de personnes affectées psychologiquement et au moins 250 morts au cours de ces 25 dernières années (Masson, Garry, Ballais, 1996).

Les responsables de l'aménagement de ces plaines sont donc aujourd'hui amenés à prendre des décisions de gestion des digues (destruction, conservation, renforcement, surélévation...) alors qu'ils manquent cruellement de connaissances sur les incidences de telles actions sur le plan du risque d'inondation.

C'est pour leur apporter des éléments de réponse que nous avons développé, à la demande du Conseil Général de l'Hérault et de la Direction Ré-

gionale de l'Environnement du Languedoc-Roussillon, une méthode aidant au diagnostic des plaines inondables structurées par de nombreuses digues. Basée sur la valorisation fine des photographies aériennes prises lors d'inondation en zone de plaine, la méthode élaborée constitue une avancée réelle dans la connaissance :

- 1) du fonctionnement hydraulique des digues pendant la crue;
- 2) de l'aléa inondation lui-même.

En fournissant une caractérisation de l'état hydraulique de l'ensemble du champ d'inondation à travers la détermination de la hauteur de submersion (ou de la cote de l'eau) en tous points avec une précision acceptable (quelques décimètres), elle procure une vision nouvelle de la plaine inondée qui intègre pleinement les digues. En ce sens, elle se situe à un niveau intermédiaire et complémentaire aux approches existantes en matière d'étude de l'aléa.

Par la connaissance qu'elle fournit, elle constitue donc un élément d'aide à la gestion des plaines, notamment des digues, vis-à-vis de la problématique inondation.

Réflexions préalables

■ Une meilleure analyse de l'aléa pour une meilleure gestion du risque d'inondation

Le risque est généralement défini comme le résultat de la confrontation de deux facteurs indépendants que sont l'aléa et la vulnérabilité (Gilard, 1998).

Damien Raclot
Christian Puech
Laboratoire
commun de
télé-détection
Cemagref-
Engref
500, rue J.-F.
Breton
34033 Montpellier

nappe, et le demeurant sous conditions de fortes crues (nappes phréatiques restant profondes), et hors condition fortement arides absentes en France (forte évaporation en zones d'épandage), les volumes inondants se conservent pour l'essentiel le long d'un cours d'eau en crues » (Oberlin, 1995).

Il en résulte que toute évacuation localement accélérée des crues déplace la plupart du temps le problème de l'excès de volume vers l'aval. Il convient donc de considérer l'inondation à l'échelle de résolution des problèmes adaptée à ces transferts, c'est-à-dire le bassin versant (Gilard, 1998).

Ce rappel montre la nécessité d'intégrer l'ensemble de la problématique inondation dans une approche spatialisée et cohérente à l'échelle du bassin versant. Cette échelle sera appelée **échelle d'analyse globale**.

Notons que la non considération de cette échelle d'analyse a souvent conduit les aménageurs à favoriser le concept de « Transit Maximum », aggravant l'aléa pour les zones à l'aval. Il semblerait aujourd'hui que ce concept soit heureusement supplanté par un concept réactualisé : celui de « Ralentissement Dynamique » qui préconise la répartition diffuse du volume (Gilard, 1998).

■ **Les digues et les inondations**

Les digues sont, par définition, « de longues constructions destinées à contenir les eaux » (Robert). Leur incidence sur les processus d'écoulement des eaux doit être analysée aux deux échelles décrites ci-dessus :

– à l'échelle locale : depuis toujours, elles sont utilisées pour protéger des terrains de la montée des eaux. Leur construction est motivée par un souci de valorisation économique (mise en culture, constructions,...) ;

– à l'échelle globale du bassin versant : elles jouent un rôle majeur dans le transfert amont-aval de l'eau qui dépend de leur disposition à l'intérieur du lit majeur. En effet, les digues longitudinales (parallèles au cours d'eau), concourent généralement à accélérer les transferts, alors que les digues transversales concourent à freiner ce transfert en favorisant l'étalement et le stockage.

Si l'échelle d'action sur les digues est l'échelle locale, l'échelle de décision, qui doit également tenir compte de l'échelle locale pour l'analyse de la

vulnérabilité des terrains protégés, doit avant tout être globale afin de gérer le problème d'inondation dans son ensemble.

Contexte général de notre recherche

Notre travail est parti du constat suivant, émanant de nos commanditaires : il existe de nombreux jeux de photographies aériennes verticales prises au cours de l'étalement des eaux qui sont peu ou mal exploités (uniquement sur un mode qualitatif ou par seule détermination des limites de crue). Or, ces photographies offrent une vision spatialisée 2D de l'inondation (plan horizontal) très intéressante, notamment pour l'analyse locale. Elles constituent une source potentiellement très riche d'informations, notamment en ce qui concerne le fonctionnement hydraulique des digues. En 1987, Doridot et Garry avaient déjà explicité les potentialités des photographies aériennes : possibilité d'extraction d'informations qualitatives sur les effets de barrages à l'écoulement, les grands courants d'écoulement de la crue, les points de fuite, ...

Notre idée a été de traiter simultanément l'ensemble des informations localisées (qualifiées de « floues », car peu informatives si on les considère une à une), dans un schéma global en ayant recours à un Système d'Information Géographique (S.I.G.).

■ **Objectifs de l'étude**

Nous avons cherché à approcher le rôle des digues en passant d'une vision 2D du champ d'inondation offerte par les photographies à une vision 3D (détermination des hauteurs de submersion).

La méthodologie, que l'on veut mettre au point, est un diagnostic du champ d'inondation établi à l'échelle locale en période de crue. Le passage ultérieur à des décisions en terme de gestion devra bien entendu intégrer l'échelle globale.

■ **Site et données**

Site

La zone d'étude est la basse plaine de l'Hérault où des inondations récurrentes se produisent (figures 1 et 2). Les inondations s'étalent sur plusieurs kilomètres de large, et couvrent des zones rurales essentiellement couvertes de vignes. Pour



▲ Figure 2. – Illustration de la zone d'étude lors de l'inondation de décembre 1997. (Photographie oblique prêtée par la DDE 34)

se défendre de ces inondations, depuis des siècles, les paysans ont construit des digues et fossés, destinés à protéger champs ou habitations et souvent à améliorer l'évacuation des eaux en les canalisant (*cf* encadré 1 en fin d'article).

Nous nous sommes intéressés à un tronçon du fleuve long de 8 km. Le champ d'inondation correspondant, large de 2,5 km en moyenne, touche les communes de Bessan, Saint Thibéry et Florensac. Coupé par l'autoroute A9 en son milieu, il se situe à une dizaine de kilomètres de l'estuaire de l'Hérault.

Données

Les données recueillies concernent l'inondation de l'Hérault de début novembre 1994 (du 4 au 6 novembre) ; elles sont de trois ordres :

- des données spatiales, dont la pièce essentielle est un jeu de photographies aériennes d'inondation au 1/18000 prises le 6.11.1994 vers 13h00. Sur les 50 clichés noir et blanc acquis par le Conseil Général de l'Hérault, nous avons sélectionné 5 clichés représentatifs couvrant 2000 ha sur les 3 communes de Bessan, Saint Thibéry et Florensac. On a eu accès par ailleurs à un autre jeu de photos aériennes panchromatiques, au 1/20000, hors période d'inondation ;
- des données hydrologiques sur l'événement du 4 au 6.11.1994, donnant notamment la chroni-

que des débits à Florensac. Leur analyse indique que les photos ont été prises environ 12h après le maximum de crue dans la zone d'étude. Par ailleurs, une étude hydrologique effectuée par le Conseil général de l'Hérault donne une période de retour légèrement supérieure à 10 ans pour le débit de pointe à Montagnac, ville située environ 20 km à l'amont de la zone d'étude ;

- des données topographiques précises par points cotés, acquises par la DDE34 lors de la construction du pont de l'autoroute A9 et enfin des données extérieures telle la BDtopo® de l'IGN, utilisée pour l'aide à la photo-interprétation des haies, talus, digues et fossés. Notons que, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) à notre disposition sur la zone d'étude, à maille carrée de 50 m, avait une précision altimétrique de l'ordre du mètre, ce qui est insuffisant pour des exigences de calculs hydrauliques.

Méthode

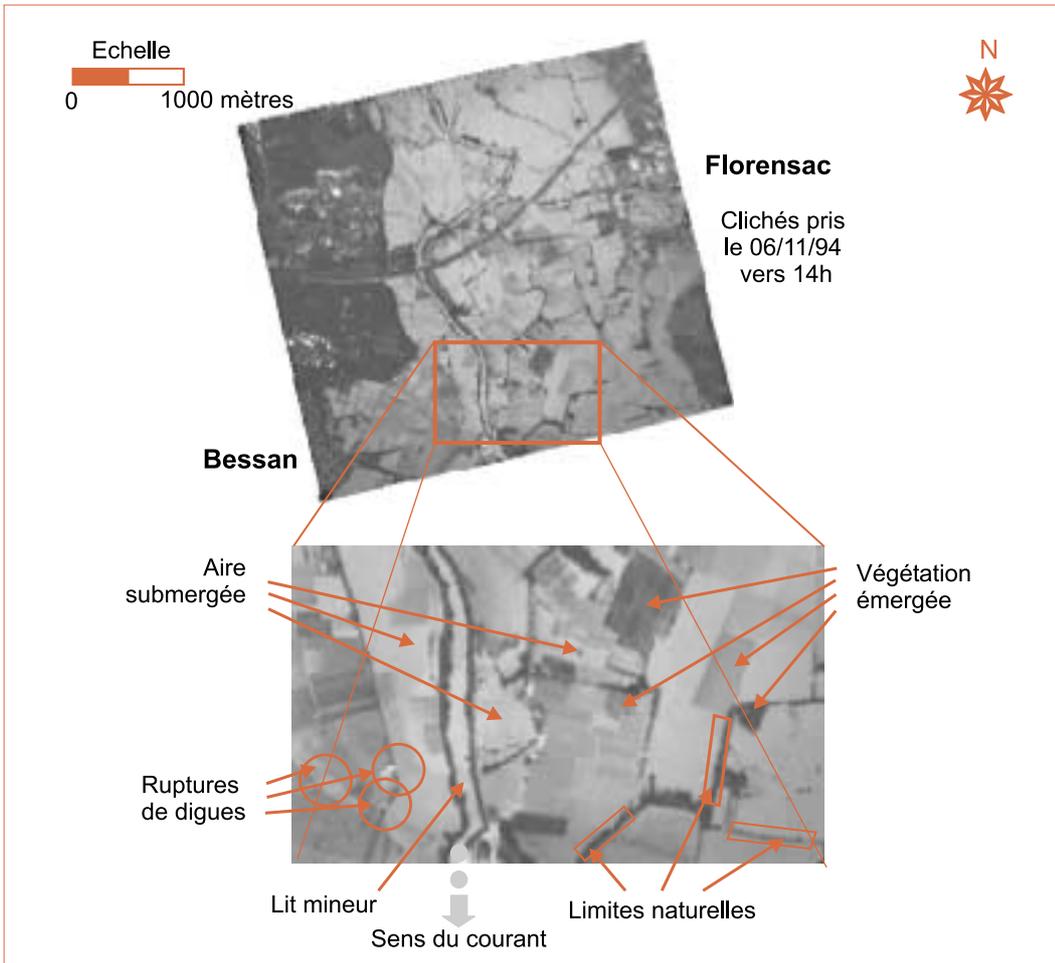
■ Cadre général de la méthode

Notre principale source de données spatiales provient de la télédétection, par l'intermédiaire de photographies aériennes et notre problématique est hydraulique par la caractérisation des hauteurs de submersion en tous points du champ d'inondation.

Côté données spatiales, nous nous sommes appuyés sur une analyse à la fois de la radiométrie, de la structure, et de la texture des photographies aériennes. Ceci nous a permis d'observer trois types d'informations (figure 3) :

- des limites naturelles (haies, fossés talus ou digues) qui compartimentent la plaine d'inondation en secteurs où la cote de l'eau et celle du terrain naturel peuvent être supposées uniformes ;
- des informations de submersion ou de non-submersion ;
- des informations sur des flux (ruptures de digues, traces d'écoulements).

Côté hydraulique, l'enjeu est une bonne définition des hauteurs de submersion et des niveaux (cotes) de l'eau en tous points de la plaine, par une méthode plus simple à mettre en œuvre que des modélisations hydrauliques complètes.



◀ Figure 3. – Exemple de photographie aérienne de l'inondation et types d'informations extraites (limites naturelles, végétation émergée ou submergée, traces d'écoulement).

Photo : Conseil général de l'Hérault

L'important est donc de trouver un mode d'appréhension de l'espace qui permette de faire la liaison entre les informations horizontales issues des photographies et les informations verticales recherchées.

■ Appréhension du champ d'inondation

L'analyse des informations contenues dans les photographies d'inondations et des objectifs hydrauliques nous a conduit à retenir un mode de description de l'espace en trois phases :

- la phase 1 consiste à découper la plaine en objets homogènes du point de vue hauteur de submersion (ou cote de l'eau) que nous avons appelé « casiers » : c'est le contenant ;
- la phase 2 consiste à renseigner ces casiers par des attributs internes qui correspondent ici aux

hauteurs de submersion : c'est le contenu ;

- la phase 3 consiste à exprimer les relations de connectivité entre objets, correspondant aux circulations hydrauliques entre casiers : ce sont les échanges.

Le tableau 1, ci-après, illustre le mode retenu d'appréhension de l'espace.

	Description de l'espace	Correspondance hydraulique
Phase 1	Segmentation en éléments homogènes	Casiers hydrauliques
Phase 2	Attributs internes	Hauteur de submersion
Phase 3	Relations de connectivité	Circulations hydrauliques

◀ Tableau 1. – Description de l'espace orientée par l'hydraulique.

Type de relation de connexité	Signification hydraulique	Ecriture numérique des contraintes	Actions de rectification
Flux	$Z_{amont} \geq Z_{aval}$	$Z_{aval}^{max} \leq Z_{amont}^{max}$ $Z_{amont}^{min} \geq Z_{aval}^{min}$	$Z_{aval}^{max} = Inf[Z_{aval}^{max}; Z_{amont}^{max}]$ $Z_{amont}^{min} = Sup[Z_{amont}^{min}; Z_{aval}^{min}]$
Equilibre entre casiers voisins i et j	$Z_i \approx Z_j$	$Z_j^{max} \leq Z_i^{max} + 0,10m$ $Z_i^{max} \leq Z_j^{max} + 0,10m$ $Z_i^{min} \geq Z_j^{min} - 0,10m$ $Z_j^{min} \geq Z_i^{min} - 0,10m$	$Sup[Z_i^{max}; Z_j^{max}] =$ $Inf[Z_i^{max}; Z_j^{max}] + 0,10m$ $Inf[Z_i^{min}; Z_j^{min}] =$ $Sup[Z_i^{min}; Z_j^{min}] - 0,10m$
Indéterminé	Néant	Néant	Néant

▲ Tableau 2. –
Écriture des contraintes entre casiers voisins.

Phase 1 : Segmentation de la plaine en éléments homogènes : les casiers hydrauliques

L'espace est segmenté en « casiers », zones topologiquement fermées à niveau d'eau uniforme et explicites sur les photographies. Les règles de détermination sont définies comme suit :

- les limites principales sont imposées par les structures linéaires visibles sur images photos d'inondation et hors inondation : les haies, fossés, talus et digues définissent un canevas important de limites paysagères, avec l'inconvénient de ne pas fournir des entités fermées mais un jeu de lignes incomplètes ;

- la cote du terrain naturel doit être sensiblement homogène à l'intérieur de tout casier, sinon il faut le décomposer en polygones plus petits. La plupart des limites correspondent à des talus, fossés ou des digues et sont donc incluses dans les limites paysagères ci-dessus ;

- la taille du casier est limitée afin que la cote de l'eau puisse être considérée comme homogène (écart maximum de ± 10 cm, précision de travail en dessous de laquelle il est illusoire de descendre). Compte tenu de la pente longitudinale générale de la plaine (5/10000), on a estimé qu'un

tel écart était obtenu avec une longueur de casier inférieure à 400 m.

En nous basant sur les lignes paysagères fortes et le critère de taille, nous avons fermé manuellement les casiers.

Phase 2 : Renseignement interne des casiers : en hauteur de submersion

Pour décrire chaque casier en terme de hauteur de submersion, nous avons utilisé deux sources de photographies aériennes : hors inondation et pendant l'inondation.

Les photographies aériennes hors inondation définissent l'occupation du sol de la plaine. Quand les éléments de terrain ont une hauteur connue, cette occupation du sol peut être transformée en une cartographie des hauteurs d'objets. Sur notre site d'étude, c'est le cas des vignes, majoritaires, avec une hauteur bien définie par leur mode culturel. Les photographies aériennes d'inondation renseignent par ailleurs sur le caractère plus ou moins émergé de ces différents objets. Pour une partie des casiers, l'émergence ou non d'objets de hauteur connue définit alors une fourchette d'estimation de la hauteur de submersion de type :

$$H^{min} < H < H^{max}$$

où H^{min} est la hauteur de submersion minimum et H^{max} la hauteur maximum. Pour les autres casiers, on retient $H^{min} = 0$ et on donne à H^{max} une valeur supérieure à un seuil donné qui correspond à la valeur sûrement non dépassée pour l'inondation étudiée (par exemple 3.00 m). Cette phase 2 procure l'estimation d'une fourchette de hauteurs de submersion $[H^{min}, H^{max}]$ pour chaque casier.

Phase 3 : Relations de connexités entre casiers : circulations hydrauliques

Les relations de connexité concernent les flux ou les équilibres entre casiers voisins. Ces informations sont accessibles par interprétation des photographies aériennes d'inondation et par connaissance des brèches de digues observées lors d'une campagne terrain après la crue. On retient trois types d'information : soit des flux visibles (liaison hydraulique avec sens de circulation), par traces d'écoulement ou par déversements au-dessus des digues qui définissent une hiérarchie de type amont/aval ; soit une liaison hydraulique sans circulation qui définit un équilibre entre casiers voisins ; soit aucune observation nette entre casier qui ne procure pas d'information utilisable.

L'objectif de la phase 3 est de valoriser ces informations de connexité pour aboutir à une estimation globale des cotes de l'eau dans la plaine. Pour cela, on propose de transcrire les connexités hydrauliques en contraintes agissant sur les fourchettes de hauteurs de submersion définies en phase 2.

■ **Transcription des relations de connexité en contraintes**

La transcription utilise des conditions hydrauliques simples écrites entre casiers voisins à savoir : s'il y a flux, la ligne d'eau descend de l'amont vers l'aval ; s'il y a équilibre hydraulique, la ligne d'eau

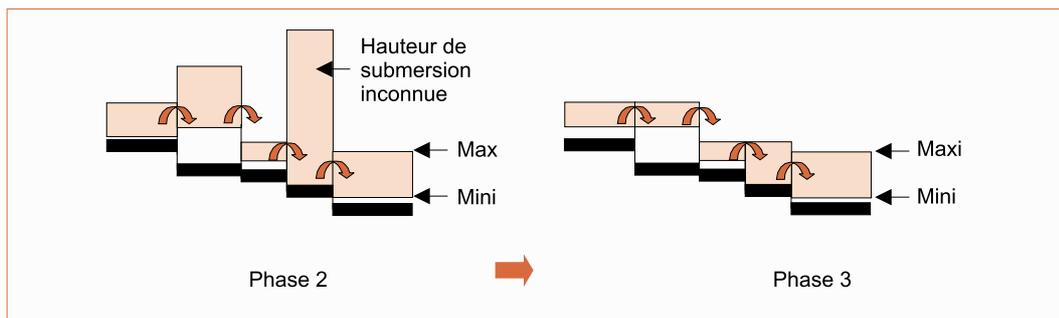
garde sensiblement la même cote, à une incertitude près (nous avons choisi ± 10 cm, en liaison avec l'écart maximum exprimé en phase 1). Il faut noter que ces conditions concernent désormais les cotes de l'eau Z et non plus les hauteurs de submersion H . Le passage de hauteurs de submersion en cotes se fait par utilisation des cotes (NGF) du terrain naturel.

On écrit que les plages $[H^{min}, H^{max}]$ des casiers voisins doivent être compatibles. Par exemple, s'il y a flux entre deux casiers voisins, on écrit notamment que la cote minimale amont ne peut être inférieure à la cote minimale aval; en cas contraire, on rectifie cette cote amont. Le tableau 2 explicite l'ensemble des contraintes retenues.

■ **Résolution du système de contraintes**

La résolution proposée pour ce système de contraintes part de l'hypothèse que les valeurs des hauteurs de submersion H^{min} et H^{max} issues de la phase 2 sont fiables. Dans le cas contraire, apparaîtront des incompatibilités entre casiers et obligation de relaxer certaines des estimations H^{min} ou H^{max} . Cette hypothèse est vérifiée par des phases d'analyse de la cohérence et par contrôle de la convergence des estimations.

Dès lors, chaque application de contrainte induit un resserrement de la plage d'estimation $[H^{min}, H^{max}]$, ce qui est accepté tant que la cohérence hydraulique entre casiers n'est pas en cause. L'application du grand nombre de contraintes induit également des estimations pour des casiers initialement non renseignés mais insérés dans un cheminement hydraulique. La figure 4 explicite cette évolution entre les phases 2 et 3 : resserrement de certaines estimations H^{min} et H^{max} et obtention d'estimations pour des casiers intermédiaires initialement non renseignés.



◀ Figure 4. – Effet de la satisfaction des contraintes liées au flux.

La résolution du système de contraintes se déroule en trois phases successives : contrôle de cohérence initiale, rectifications pour les flux, rectifications pour les équilibres.

■ **Contrôle de cohérence initiale (en niveaux)**

Cette étape consiste à vérifier qu'il n'existe aucune incompatibilité entre casiers voisins. Deux règles sont analysées : pour les flux, on vérifie que la ligne d'eau ne remonte pas ($Z_{\max}(\text{amont}) \geq Z_{\min}(\text{aval})$); pour les équilibres hydrauliques, on vérifie qu'il existe une plage commune dans les estimations ($Z_{\max}(1) \geq Z_{\min}(2)$ et $Z_{\max}(2) \geq Z_{\min}(1)$). Cette étape est très intéressante car elle permet d'émettre un premier jugement sur la qualité (cohérence) des estimations issues de la phase 2. En cas d'incompatibilité, il est possible, à ce niveau, de relaxer la plage d'estimations sur quelques casiers.

■ **Rectifications pour les flux**

Cette étape est appliquée en deux parties : 1) par balayage amont \rightarrow aval pour les cotes maximales, 2) par balayage aval \rightarrow amont pour les cotes minimales. Elle s'inspire de l'organisation des calculs, classique en hydraulique, quand la propagation des informations est orientée amont-aval. Ceci permet de résoudre facilement des schémas numériquement complexes. Un classement préalable des casiers respectant l'ordre amont-aval permet de guider le calcul pour les casiers qui sont touchés par des relations de flux.

■ **Rectifications pour les équilibres**

La résolution des équilibres est numériquement plus délicate car non orientée. Notre choix de résolution a consisté à appliquer les contraintes d'équilibre, successivement à tous les couples de casiers voisins concernés. Chaque application de contrainte est susceptible de resserrer les intervalles Min-Max du couple lui-même. Ces modifications de cotes pouvant affecter les relations d'équilibre avec d'autres casiers plus lointains, un premier bouclage jusqu'à convergence est nécessaire. De plus, les relations de flux elles-mêmes peuvent être affectées par ces modifications de cotes. Il faut donc opérer un bouclage plus général entre les phases « flux » et les phases « équilibres » jusqu'à stabilisation et convergence totale.

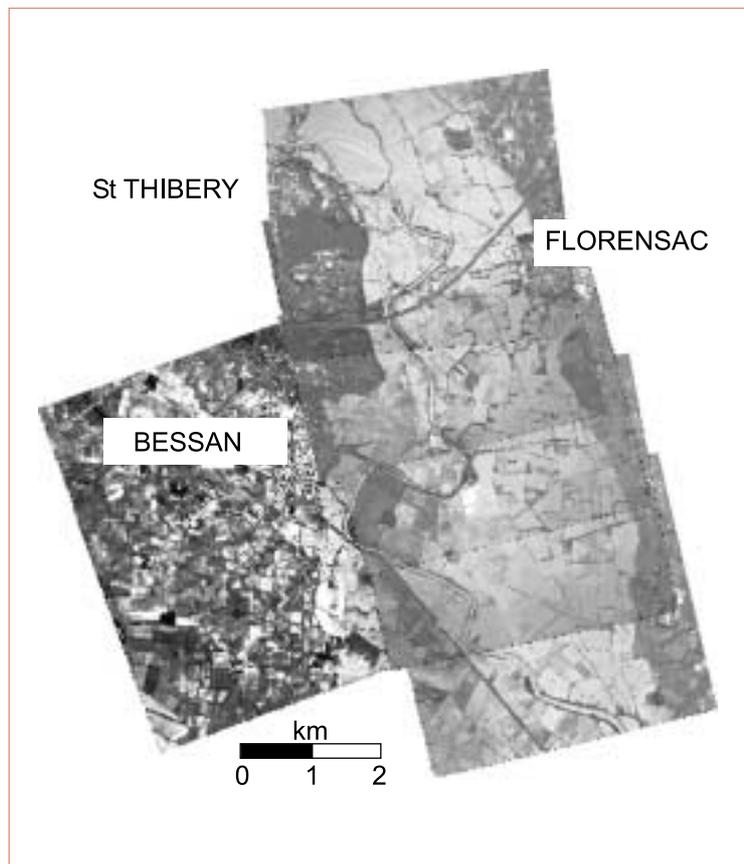
Au cours de ces deux bouclages, l'organisation des calculs permet de repérer facilement les zones de non-convergence et d'ambiguïté et de rectifier les estimations initiales sur les seuls casiers « coupables » avant de relancer la résolution des contraintes.

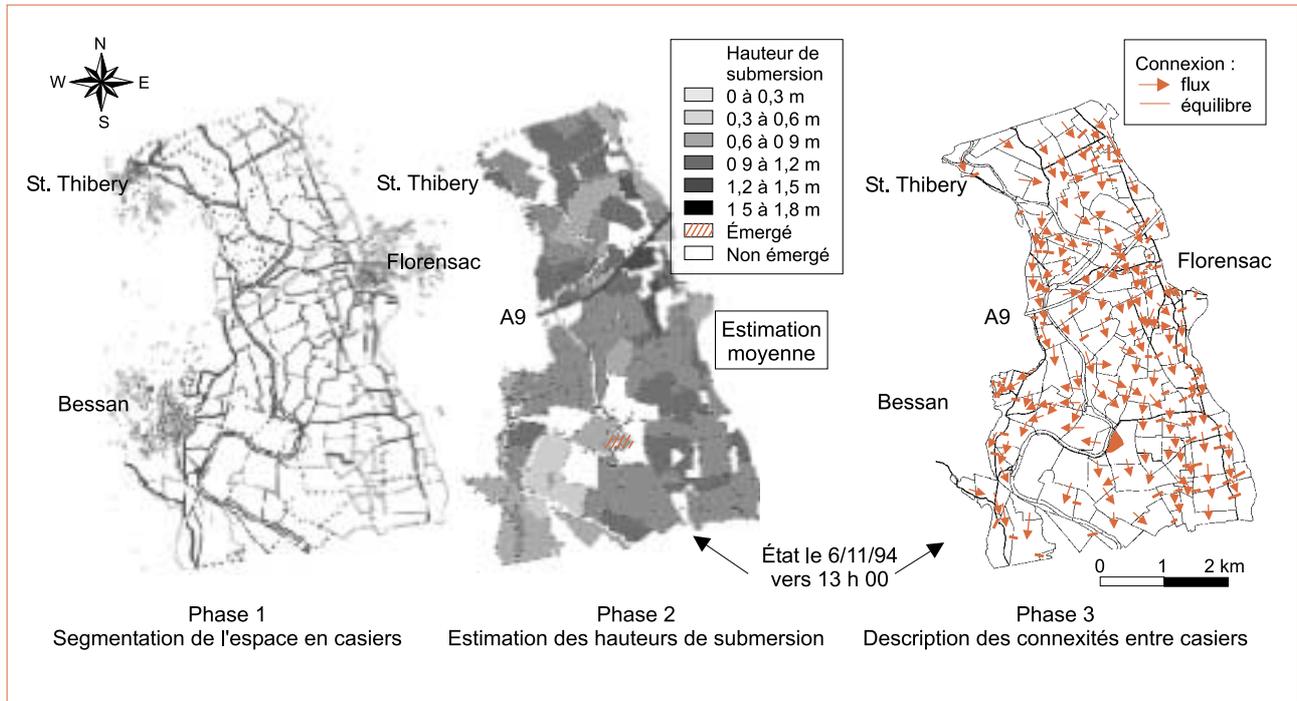
Résultats

L'application a été menée sur la basse vallée de l'Hérault.

L'ensemble des données a été extrait en utilisant deux types de logiciels : un logiciel de traitement d'image (ERDAS Imagine) et un logiciel de Système d'information géographique (Arc-Info) qui permet la gestion de l'ensemble des données. En préalable à l'extraction, les 5 photographies d'inondation ont été scannées (résolution 300 dpi), géoréférencées, puis assemblées géométriquement (figure 5).

▼ Figure 5. – Mosaique des 7 photographies aériennes d'inondation.





■ **Extraction des données sur photographies aériennes (figures 3 et 6)**

La phase de segmentation a conduit à un découpage de la plaine en 300 casiers à l'intérieur desquels le niveau d'eau est supposé constant (figure 6 - phase 1).

Par croisement de l'occupation du sol et du caractère plus ou moins émergé de ces objets sur les photographies d'inondation, nous avons abouti à un renseignement de 66% des casiers avec une fourchette d'estimation de +/- 23 cm. Cette faible incertitude provient de l'existence d'informations souvent multiples et donc complémentaires pour un même casier. La figure 6 (phase 2) visualise la répartition des valeurs de submersion moyennes $[(H_{min} + H_{max})/2]$ déduites pour chaque casier de la plaine.

L'observation des circulations a été effectuée en utilisant conjointement un plan des brèches établi par le Conseil général de l'Hérault et toutes les informations recueillies sur les photographies aériennes. En tout, cela a conduit à définir environ 140 relations de flux et 70 relations d'équilibre qui sont autant de relations de connexité. La description des circulations entre casier sur la zone d'étude est présentée figure 6 (phase 3).

Le passage en cote de l'eau a été rendu possible par l'utilisation de relevés topographiques précis de la plaine (aimablement communiqués par la DDE de l'Hérault), ce qui a permis ensuite la transcription numérique des 140 relations de flux et des 70 relations d'équilibre en contraintes sur les cotes de l'eau. On a ainsi fait apparaître 560 contraintes $(140 \times 2 + 70 \times 4)$, soit autant d'actions potentielles de rectification sur les cotes minimales et maximales issues de la phase 2.

■ **Résolution du système de contraintes et convergence**

La résolution du système de contraintes a été effectuée selon le schéma méthodologique indiqué précédemment, en utilisant une programmation spécifique (Raclot, 1997). La phase de cohérence initiale n'a indiqué aucune incompatibilité hydraulique entre casiers voisins renseignés en phase 2, ce qui est déjà une indication intéressante sur la robustesse de l'approche.

Sur 300 casiers traités en phase 3, la résolution du système de contraintes a montré un défaut de convergence dû à deux ambiguïtés légères entre casiers voisins : un élargissement de la plage de hauteur Min-Max de 10 cm pour ces deux cas a suffi pour éliminer ces problèmes de convergence.

▲ Figure 6. – Extraction des données sur photographies aériennes.

Par application du système de contraintes sur les estimations de cotes (passage de la phase 2 à la phase 3), le pourcentage de casiers renseignés passe de 66% à 82% tandis que l'incertitude sur les cotes (valeur moyenne de $(H^{min} - H^{max})/2$) passe de ± 23 cm (pour les 66% renseignés) à ± 16 cm (pour les 82%). Le gain de précision est donc important : il touche à la fois le nombre de casiers et la qualité de l'estimation.

Pour un grand nombre de casiers, l'incertitude sur l'estimation des cotes de l'eau est à peine supérieure au décimètre, ce qui correspond à l'objectif de qualité recherché : sachant que le décimètre est à la fois l'unité minimale de nos mesures et l'unité acceptable pour une estimation satisfaisante (dans presque tous les cas) du point de vue hydraulique.

■ **Validations et contrôles de cohérence**

Les validations ont porté sur une comparaison avec des relevés de laisses de crue sur le terrain, qui ont donné des informations délicates à exploiter dans la mesure où nos résultats caractérisent l'instant de prise de vue tandis que les laisses de crue caractérisent le maximum de la crue en chaque point (qui peut être atteint à des instants différents selon la position géographique). Les deux types d'information apparaissent globalement cohérents, malgré des traces de laisses de crue plus élevées en lit majeur, surtout quand on s'éloigne du centre de la plaine.

L'analyse de la cohérence globale par coupes longitudinales et transversales (figures 7 et 8) de la plaine, complète ces résultats et explique les différences. Les coupes longitudinales donnent, comme on peut s'y attendre, une diminution lente et régulière des cotes dans le sens amont aval. Les coupes transversales sont plus informatives.

D'une part, certaines coupes (ex AB, de la figure 8) montrent une baisse brutale du niveau de l'eau, ce qui est révélateur du bon fonctionnement de la digue correspondante. Ainsi, sans faire d'a priori sur les pertes de charges, ni la tenue ou la non-tenue des digues, la méthode est capable de nous informer sur le fonctionnement de tel ouvrage particulier.

D'autre part, les coupes type CD-EF (figure 8) montrent une forte évolution du niveau d'eau entre le centre (lit mineur) et les bords de la plaine. Alors que la décrue a déjà commencé (les photos sont prises 12h après le maximum de crue), l'eau continue donc de s'épandre vers les bords du lit majeur. On met donc fortement en évidence une forme non plane du toit de l'eau, ainsi que des disparités entre les instants des maxima selon les points d'observation. Enfin, ce résultat est cohérent avec des laisses de crues supérieures à nos

Figure 7. – Résultats d'estimation en niveaux d'eau.

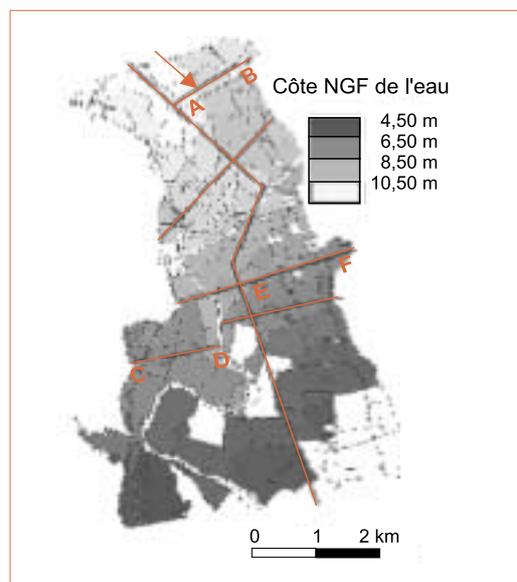
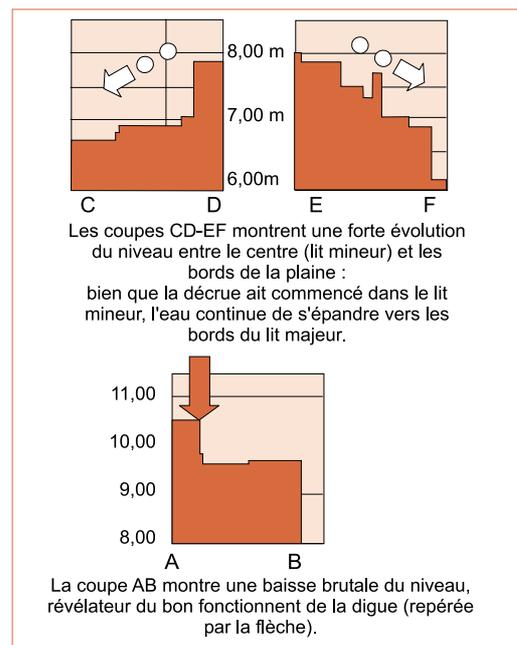


Figure 8. – Coupes transversales associées. ▼

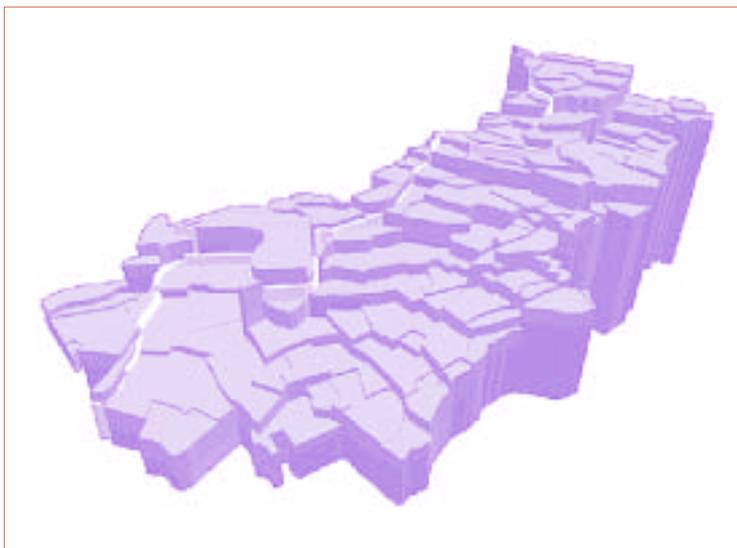


estimations sur les bords du lit majeur, car le niveau continue de monter dans les points considérés.

Ceci confirme que, sur ce type de plaine très structurée, l'utilisation d'une modélisation hydraulique monodimensionnelle n'est pas adaptée car elle ne peut pas rendre compte des variations transversales des cotes de l'eau à chaque instant.

■ **Extension aux casiers non renseignés**

Pour finir, une cote de l'eau a été affectée aux casiers non renseignés (18 %) en moyennant la cote de l'eau dans les casiers connexes. Ceci peut se justifier par la faible probabilité de présence de casiers parfaitement isolés hydrauliquement. La figure 9 illustre le résultat final après extension dans une vue 3D de la zone d'étude.



Intérêt et limites de la méthode

■ **Diagnostic sur le niveau d'eau et le fonctionnement des digues**

À partir de photographies aériennes, on atteint une connaissance du toit de l'eau tout à fait intéressante. On met en évidence les effets de la structuration hydraulique de la plaine comme le rôle effectif des digues sans avoir fait d'hypothèses préalables sur les pertes de charge ou leur tenue. On a donc un outil pouvant aider à répondre aux questions suivantes : quelles sont les digues submergées ? Avec quelles hauteurs ? Quelles sont celles qui ont cédé ? Quel est le rôle hydraulique effectif de telle ou telle digue pour la crue concernée ?

De plus l'utilisation d'un SIG facilite grandement une vision globale et spatialisée du champ d'inondation. Elle permet, par exemple, un calcul aisé des volumes stockés et des volumes stockables.

Ainsi, en repassant à l'échelle globale du bassin versant, ceci peut donner source à des scénarios de suppression ou renforcement de certaines de ces structurations tout en se situant dans un schéma favorable à l'application pratique du concept de Ralentissement Dynamique.

■ **Outil complémentaire aux modélisations**

Cette méthode permet d'avoir rapidement une estimation numérique des niveaux de l'eau dans

la zone inondée à l'instant des clichés photographiques.

Replaçons cela par rapport aux méthodes existantes : on a d'un côté les méthodes hydrogéomorphologiques (Masson *et al*, 1996), qui définissent une submersion probable des plaines à partir des éléments de géomorphologie, méthode simple mais surtout qualitative ; et par ailleurs des modélisations hydrauliques de zones inondées, opérations lourdes et coûteuses, donnant des renseignements quantitatifs précis sur cotes, vitesses, et durées des phénomènes; ces méthodes servent ensuite dans l'étude des risques d'inondations telle la méthode inondabilité (Gilard, 1998).

Notre méthode s'insère entre ces deux extrêmes. Elle apparaît **complémentaire** par sa capacité à donner des résultats spatialisés quantitatifs qui peuvent compléter l'information hydrogéomorphologique et servir *d'aide au calage, à la validation des modélisations hydrauliques.*

En effet, d'une part, la connaissance de l'état hydraulique, obtenue seulement à l'instant de la photo aérienne, n'est pas suffisante pour une connaissance globale du phénomène inondation et notre approche ne saurait remplacer les autres méthodes.

Mais, d'autre part, même les modélisations ont leurs limites : par exemple, elles nécessitent de définir a priori des coefficients de rugosité ou de pertes de charge pour des éléments mal connus

Figure 9. – ▲
Vue 3D des estimations des cotes de l'eau.
Infographie :
Philippe Falandry,
CNUSC, 1998.

(haies) ou susceptibles de varier au cours de la crue (digues). Notre méthode d'observation numérique par photographie, qui permet justement de tirer des informations sur l'importance de tel ou tel frein hydraulique, peut alors renseigner un état initial ou une phase de la crue et donc servir lors du calage ou de validation des modélisations. De ce fait, même si l'analyse locale proposée est effectuée sur une partie restreinte du bassin versant, elle peut aider le calage d'une modélisation qui permet de repasser à un niveau d'analyse globale (bassin versant).

C'est bien dans la fourniture de renseignements spatialisés, à la fois quantitatifs et en grand nombre sur toute la plaine d'inondation, que la méthode présente le plus grand intérêt puisqu'elle vient combler ce qui constitue souvent le principal frein à l'utilisation des méthodes classiques.

■ *Conditions d'utilisation*

Un site adapté

L'intérêt de cette méthode dépend du type de plaine inondée : la plaine doit être large et structurée par des éléments naturels (digues, haies). Elle doit également être couverte d'objets dont la hauteur connue est proche des hauteurs de submersion généralement observées pour que ces objets soient émergés pour les uns et immergés pour les autres. Cela peut être la vigne comme dans notre cas, mais on peut imaginer exploiter bien d'autres types d'objets : autres types de végétation, clôtures, cabanons...

Données nécessaires

La méthode peut être décomposée en deux grands ensembles : l'un pour caractériser les éléments permanents et l'autre s'intéressant à l'événement (seul renouvelable à chaque observation).

Le premier ensemble est la constitution du SIG, la segmentation de l'espace (phase 1) et le repérage des objets plus ou moins permanents ayant une hauteur connue. Il représente un lourd travail réalisé à partir du jeu de photographies d'inondation et d'un jeu de photos aériennes verticales hors inondations pris le plus près possible de la date de l'inondation étudiée. L'énorme avantage est son fort caractère permanent (notamment la segmentation de l'espace qui s'appuie sur des structures stables), permettant la réutilisation de

ce lourd travail initial pour toute nouvelle inondation.

Le second ensemble est la caractérisation et la valorisation de tous les éléments particuliers à l'événement étudié : l'émergence des objets et les circulations. Bien que très rapide et très simple de mise en œuvre, il a besoin d'un lot suffisant d'informations (émergences et circulations), recueillies en un intervalle de temps réduit, pour que leur utilisation conjointe soit informative au point de vue des cotes de l'eau. Remarquons que ce second ensemble peut être réalisé par d'autres sources de données que les photographies aériennes verticales d'inondation. On pense, par exemple, aux images prises à partir d'hélicoptère, que ce soient des vidéos prises par des équipes de télévision ou des photographies aériennes (obliques à basse altitude) prises lors de campagnes de reconnaissance par les équipes de secours. L'important est de réunir, en un temps réduit, un lot important d'informations sur la zone d'étude.

Ce besoin en données constitue la principale limite d'utilisation de la méthode puisqu'il faut obtenir des photos aériennes au cours de la crue, ce qui impose d'être prêt dès que les conditions météorologiques le permettent.

Il faut également noter que la valorisation des circulations (phase 3) utilise des cotes, ce qui impose de recourir à des données altimétriques précises pour le terrain naturel.

Précisions de la mesure de la cote

Notons enfin que la précision d'estimation obtenue des cotes de l'eau s'évalue en décimètres, ce qui est globalement compatible avec les exigences hydrauliques dans le lit majeur, zone de débordement de la rivière.

■ *Conclusion, perspectives*

La méthode présentée est une approche originale des inondations de plaines à partir de photographies aériennes. Elle valorise le grand nombre d'observations floues sur la zone inondée pour obtenir une détermination relativement précise du toit de l'eau à l'instant de la prise de vue par mise en cohérence dans un schéma global de résolution.

Rappelons que les résultats sont obtenus avec des équations hydrauliques réduites à leur plus sim-

ple expression, ce qui en fait toute la robustesse, et que, malgré cela, la précision d'estimation est décimétrique.

L'approche spatiale, par télédétection aérienne, montre ainsi sa capacité à compléter les outils de diagnostic d'inondations de plaine quand l'approche est pensée en liaison spatial-hydraulique. On a indiqué que la mise en œuvre est délicate pour la phase initiale de segmentation et pour la création du SIG. Toutefois, le SIG constitue un tel outil de gestion de l'espace permettant par exemple une confrontation directe de l'aléa et de la vulnérabilité, et de transmission de l'information par ces capacités de cartographie que « l'investissement » initial semble « rentable » à long terme.

Ensuite, la réutilisation sur des crues ultérieures est d'une grande facilité.

On ne saurait alors que préconiser la prise quasi systématique de photographies aériennes d'inondations (dès que cela est rendu possible par les conditions météorologiques) pour améliorer, par une telle exploitation, la connaissance hydraulique des zones inondées et faciliter ainsi la prise de décisions d'aménagement.

Enfin, il est peut-être bon de rappeler que les possibilités d'action sur l'aléa sont restreintes et qu'il faut, pour ramener le risque lié aux inondations à un niveau acceptable, agir en faveur d'une meilleure gestion de la vulnérabilité, ce qui ne peut être réalisé que par une approche globale et spatialisée. □

Encadré 1

La basse vallée de l'Hérault et son réseau de digues

De par son climat méditerranéen et son contexte géomorphologique régional, le fleuve côtier Hérault (34) est régulièrement soumis à des événements hydrologiques violents conduisant à des inondations. Depuis le XIX^e siècle, nous pouvons citer, à titre d'exemple, les événements de 1815, 1860, 1861, 1875, 1907-1908, 1920, 1958, 1996, 1997.

Cette récurrence explique en partie la forte densité de digues dans la basse vallée de l'Hérault. La construction de ces digues était généralement décidée par les propriétaires eux-mêmes (souvent agriculteurs ou viticulteurs), dans une logique de valorisation économique du seul environnement immédiat de la digue. Ce souci de valorisation s'est transcrit de deux manières différentes :

1. – construction de **digues longitudinales** afin de protéger champs et maisons de la montée des eaux
2. – construction de nombreuses **digues transversales**, essentiellement héritée de la crise du phylloxéra pendant la deuxième partie du XIX^e siècle (en effet, le phylloxéra était combattu par la submersion des vignes, principales cultures de la basse vallée de l'Hérault).

La forte densité de ces ouvrages, ainsi que le manque de coordination quasi systématique lors de leur construction, ont conduit :

- à un fonctionnement hydraulique très complexe de la basse vallée de l'Hérault ;
- à une problématique de gestion de ces ouvrages vieillissants dont l'état est très mal connu.



◀ Exemple de brèche dans une « digue-route » après la crue de 1997.
(Source : Conseil général de l'Hérault)



◀ Exemple de brèche dans une digue après la crue de 1997. On observe nettement l'éboulement du mur de soutènement.
(Source : Conseil général de l'Hérault)

Résumé

Au fil des siècles, la construction de nombreuses digues a rendu très complexe le schéma de circulation des eaux dans les plaines alluviales. La gestion de ces ouvrages vieillissants, et tout d'abord la compréhension de leur interaction avec les inondations et le risque associé, constituent aujourd'hui un enjeu majeur de l'aménagement des plaines.

Dans ce contexte, nous avons élaboré une méthode d'exploitation fine de photographies aériennes d'inondation, qui permet d'accéder à une connaissance spatialisée de l'aléa inondation (cote de l'eau) intégrant pleinement les digues. Intermédiaire et complémentaire à l'approche hydrogéomorphologique et à la modélisation hydraulique, cette méthode, développée sur la basse vallée de l'Hérault, améliore la connaissance de l'aléa inondation et fournit une bonne indication du rôle réel des digues pendant la crue. Elle constitue donc une première étape vers une aide à la gestion des plaines vis à vis du risque d'inondation.

Abstract

Over the centuries, the construction of several dikes has created a highly complex water circulation system in alluvial plains. The management of these ageing dikes, in particular understanding how they interact with flooding and the associated risks, is now a major consideration in land improvement work in alluvial plains.

A method was drawn up to study in detail aerial flood photographs to provide information on the area covered by occasional flooding (area of water) over the whole of the dikes. This method was part of, and additional to, hydrogeomorphological studies and hydromodelling systems. It was developed in the lower Hérault valley and provided additional information about occasional flooding showing the actual role played by the dikes during the floods. It is the first stage towards flood risk management in alluvial plains.

Bibliographie

- DORIDOT, M., GARRY, G., 1987, Application de la télédétection à l'évaluation du risque d'inondation, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, Risques Naturels, numéro 150-151, juillet/octobre 1987, p. 169-184.
- GILARD, O., 1995, Connaître les inondations : exemple de la Bourbre (Isère), *Ingénieries EAT*, numéro spécial *Risques Naturels, Inondation, du constat à la décision*, p. 7-16.
- GILARD, O., 1998. *Guide pratique de la méthode inondabilité*, Agence de l'eau, Ministère de l'Environnement, Coll. Etude Inter-Agences, numéro 60, 158 p.
- MASSON, M., GARRY, G., BALLAIS, J.-M., 1996, *Cartographies des zones inondables, approche hydrogéomorphologique*, Ministère de l'Équipement / Ministère de l'Environnement, Édition Villes et Territoires, 100 p.
- OBERLIN, G., 1995, Influence de l'occupation des sols sur les inondations, *Ingénieries EAT*, numéro spécial *Risques Naturels, Inondation, du constat à la décision*, p. 17-34.
- RACLOT, D., 1997, *Méthodologie d'exploitation de photographies aériennes d'inondation par SIG, Application à la basse vallée de l'Hérault*, DEA « Systèmes spatiaux et environnement » Université de Strasbourg, ENGEES, LCT Cemagref-ENGREF, 127 p.